

脊椎脊髄の血管解剖と動静脈シャント疾患の頭蓋内との相同性

Spinal vascular anatomy and homology of spinal and intracranial arteriovenous shunts

岡山大学大学院 脳神経外科

平松匡文

Key words: spinal cord, spinal canal, vascular anatomy, arteriovenous shunt, homology

1. はじめに

脊椎脊髄の血管解剖は、分節ごとに同じ血管構築が存在して、それが繰り返されているため、比較的単純なものである。その原則を踏まえて血管構築を考えると、その解剖は理解しやすい。また、脊椎脊髄の動静脈シャント疾患は、頭蓋内の動静脈シャント疾患との相同性を持つと考えられる。本稿の前半では脊髄と脊柱管に関係する血管解剖を概説し、後半では解剖学的特徴が類似している硬膜内以外の脊柱管内動静脈シャント疾患の血管解剖を、頭蓋内と比較しながら考察する。

2. 脊髄動脈の発生

脊髄は、腹側正中を走行する1本の前脊髄動脈 (anterior spinal artery: ASA) と、背外側を走行する2本の後脊髄動脈 (posterior spinal artery: PSA) が、中心溝動脈 (sulcal artery) や vasa corona を介して栄養している。

発生学的には、脊髄表面で動脈の血管網である vasa corona (静脈の血管網は coronal venous plexus) が形成され、各分節で前根に沿って走行する前神経根動脈 (anterior radicular artery) と後根に沿って走行する後神経根動脈 (posterior radicular artery) が vasa corona と各分節動脈を繋ぐようになる。Anterior radicular artery は上行枝と下行枝に分かれ、それらが縦方向に吻合していき、左右一対の連続する腹側縦走神経動脈 (ventral longitudinal neural artery: VLNA) が形成される。この VLNA から片側の脊髄に向かって中心溝動脈 (sulcal artery) が分岐する。その後、左右一対の VLNA が脊髄の腹側正中で癒合し、1本の ASA が形成される¹⁻⁵⁾。

縦方向の吻合が発達していく過程で anterior radicular artery の多くは退縮して ASA との連続性は失われていき、残った ASA との連続性を保っている anterior radicular artery が神経根髄質動脈 (radiculomedullary artery) と呼ばれる。最終的に radiculomedullary artery の本数は成人と同様に4-8本となる (Fig.1)。このように、脊髄動脈は当初は体節単位の横方向の繋がりを元に形成されるが、発生が進行するとともに縦方向の繋がりが優位となっていく (desegmentation)。この発生過程があるため、sulcal artery は片側ずつを支配しており、ASA の fenestration や duplication は anomaly ではなく、maturation failure ということになる¹⁻⁵⁾。

脊髄表面の血管ネットワークである vasa corona と segmental artery を交通する動脈は神経根軟膜動脈 (radiculopial artery) と呼ばれるが、anterior radicular artery にも posterior radicular artery にも認められる。Anterior radicular artery からの anterior radiculopial artery は ASA には繋がらずに vasa corona にのみ繋がり、posterior radicular artery からの posterior radiculopial artery は

vasa corona の縦方向の吻合が発達することによって生じた PSA に繋がる。この縦方向の吻合は後根が入る後外側溝のあたりで始まるが、それと共に PSA に繋がる posterior radiculopial artery も減少していき、最終的には成人と同様に 10-20 本となる (Fig.1)。この頃に脊髓円錐レベルで ASA と一対の PSA の吻合である conus basket が形成される。ASA と比較して PSA の縦方向の連続性が少ないのは、一対の VLNA が形成された上で、VLNA が癒合したものが ASA になるのに対して、vasa corona の縦方向の吻合が PSA になるためである¹⁻⁵⁾。

3. 脊髓動脈の解剖

ASA は sulcal artery および vasa corona に供血し、sulcal artery からは主に灰白質を遠心性 (centrifugal) に栄養し、ASA が脊髓腹側 2/3 を栄養することになる。一方で、PSA は脊髓背側の vasa corona に供血し、vasa corona は脊髓を全周性に取り囲み (Fig.1A,2A,B)、そこから分岐する多数の穿通枝が白質を求心性 (centripetal) に貫く。PSA が脊髓の背側 1/3 を栄養することになる。Sulcal artery 同士の間には吻合はないが、sulcal artery と vasa corona からの穿通枝の間には吻合がある。この腹側正中の縦走神経動脈の存在と、そこからの穿通枝、および周囲の回旋枝から栄養される構造は、延髄から中脳までの血管構造と相同性を持っている^{1,4)}。脊髓円錐部では ASA と両側 PSA の下端が互いに吻合して「W」字状を示し、conus basket と呼ばれる (Fig.2C)

脊椎と脊髓の成長の度合いは異なり、脊髓レベルの方が椎体レベルより吻側に存在するが、椎間孔部と神経根が脊髓に移行する脊髓表面で radiculomedullary artery が固定されるために、radiculomedullary artery から ASA にかけての走行は hairpin bend を形成することになる (Fig.1A)¹⁻⁴⁾。この成長の差が小さい頸髄レベルでは radiculomedullary artery は水平に近い走行を示す (Fig.7D) のに対して、差が大きい胸髄・腰髄レベルに移行するにつれて hairpin bend は鋭角となっていく (Fig.2C)。Radiculopial artery と PSA の間の hairpin bend は、PSA が ASA よりも外側を走行する分、より鋭角となる (Fig.3)。一方で、ASA から分岐した sulcal artery は前正中裂内を脊髓腹側から背側に走行するにつれて斜めに上行することがあり、その場合はやや鋭角となる (Fig.4)。これも ASA と脊髓の伸長の度合いが異なるために生じている可能性がある。

重要な radiculomedullary artery として、腰髄膨大部を栄養する Adamkiewicz artery (artery of the lumbar enlargement) と、頸髄膨大部を栄養する artery of the cervical enlargement がある。Adamkiewicz artery は、Th9 から L1 の間のレベルで左側の segmental artery から分岐することが多い (左 Th10 が最多)。Artery of the cervical enlargement は、椎骨動脈よりも上行頸動脈や深頸動脈から分岐することが多いことに注意が必要である。また、重要な radiculopial artery として、L5・S1 レベルから脊髓円錐部の conus basket に向かって走行する、Desproges-Gotteron artery が報告されている¹⁾。

なお、PSA は通常は脊髓神経根後根の背側を縦方向に走行するが、頭蓋頸椎移行部レベルでは後根の腹側かつ歯状靱帯の背側を縦方向に走行することが多く、lateral spinal artery (LSA) と呼ばれる⁶⁾。LSA は後下小脳動脈との吻合を持つことが多く、extracranial origin の後下小脳動脈や椎骨動脈の duplication などの anomaly にはこの LSA が関与しているとされる⁷⁾。

神経根を栄養するのは anterior/ posterior radicular artery だが、segmental artery から radiculomedullary artery や radiculopial artery が分岐する場合は、これらの血管が神経根にも供血す

ることになる⁵⁾。Radicular artery は神経根のみを栄養するが、発生学的見地からは全ての radicular artery が vasa corona との吻合を持つ可能性がある。馬尾神経では、segmental artery からの(distal) radicular artery は神経根の尾側 2/3 までを栄養し (Fig.5A)、頭側 1/3 は脊髓円錐部の conus basket から分岐する proximal radicular artery から栄養され (Fig.5B)、両者は吻合している⁸⁾。

4. 分節動脈と硬膜/硬膜外動脈

一つの脊椎レベルごとに左右一对の分節動脈 (segmental artery) が存在しており、その segmental artery 本幹から ventral branch・dorsal branch・spinal branch の 3 本の枝が分岐する (Fig.6)。Ventral branch は胸椎レベルでは肋骨下縁を走行する肋間動脈 (intercostal artery)、腰椎レベルでは腰動脈 (lumbar artery) となる。Dorsal branch は椎弓背側から棘突起の方に繋がっていき、椎弓を背側から栄養しながら走行し、棘突起に付着する筋肉や表面の皮膚に分布する (1-5)。この dorsal branch からの筋肉枝は縦方向に吻合し、血管撮影の前後像では正中を走行するが、radiculomedullary artery などの脊髓動脈に繋がる血管とは異なり、hairpin bend はなく、水平もしくはやや下向きに正中に達して、そこから下行する。

Segmental artery からの 3 分枝では spinal branch が最も重要であり、椎間孔から脊柱管内に入り、椎体を背側から栄養する dorsal somatic branch、椎弓を腹側から栄養する prelaminal artery、硬膜を栄養する radiculomeningeal artery、神経根前根/ 後根を栄養する anterior/ posterior radicular artery、脊髓を栄養する ASA/ PSA に繋がる radiculomedullary artery・radiculopial artery を分岐する¹⁻⁵⁾。Radiculomedullary artery と radiculopial artery は前述の通り発生の過程で減少していくため、それらが存在しない segmental artery の方が多い。また、segmental artery 本幹から分岐して、椎体を腹側から栄養する ventral somatic branch も存在する。すなわち、椎体は ventral somatic branch が腹側から、dorsal somatic branch が背側から栄養し、椎弓は prelaminal artery が腹側から、dorsal branch が背側から栄養している (Fig.6)。

これらの脊柱管内・脊柱管外の動脈は縦方向、横方向の吻合が豊富であり、特に椎体背側から椎体を栄養する dorsal somatic branch の上下・左右の同血管との吻合は retrocorporeal anastomosis と呼ばれており、六角形 (hexagon shape) の血管走行を示す (Fig.7A-C)。この椎体背側から椎体を栄養する dorsal somatic branch が構成する retrocorporeal anastomosis は頭蓋内まで続いており、歯突起レベルでは anterior meningeal artery、斜台レベルでは clival artery が相当し、上下・左右で豊富な吻合を示すのも同様である (Fig.7D)。一方、硬膜動脈である radiculomeningeal artery は、縦方向の吻合は豊富だが、反対側との吻合はそこまで豊富ではなく、吻合するとしても脊柱管背側の方が吻合し易いとされる⁹⁾。

これら segmental artery と各 branch の関係性は胸腰椎レベルでは分節毎の基本構造が保たれて下行大動脈から各 segmental artery が分岐するが、頸椎・上位胸椎・仙椎レベルでは縦方向で吻合して血管が再構築され、独立した分節構造では無くなっている。頸椎レベルでは segmental artery の大部分が退縮し、残った部分が縦方向に連続して、上行頸動脈 (ascending cervical artery)、椎骨動脈 (vertebral artery)、深頸動脈 (deep cervical artery) を形成する。それらの動脈から各 segmental artery とその枝が栄養され、各動脈間には各分節レベルでの吻合がある。上位胸椎レベルでは、肋頸動脈 (costocervical trunk) や大動脈から分岐する最上肋間動脈 (supreme intercostal artery) が第

1/2 胸椎分節動脈を栄養する。仙骨レベルでは内腸骨動脈から分岐する外側仙骨動脈 (lateral sacral artery) となって、背側大動脈の remnant である正中仙骨動脈 (median sacral artery) と共に、それぞれの segmental artery とその枝を栄養する。

5. 脊髄静脈

脊髄の静脈還流を担っているのは、脊髄の腹側正中を走行する前脊髄静脈 (anterior spinal vein: ASV) と背側正中を走行する後脊髄静脈 (posterior spinal vein: PSV) であり、腹側・背側中心溝静脈 (sulcal vein) から静脈血を集めて、神経根に沿う神経根髄質静脈 (radiculomedullary vein) と神経根に沿わない走行を示す架橋静脈 (bridging vein) を介して硬膜外へ流出する (Fig.8A,B)。ASA と ASV の位置的な関係性としては ASV が ASA の背側を走行しているが、これは脳底動脈と median anterior pontomesencephalic vein との関係性と同じであり、終糸の腹側に存在する artery/ vein of the filum terminale の関係性も同じである。すなわち、脳底動脈から ASA、artery of the filum terminale まで繋がる動脈と、median anterior pontomesencephalic vein から ASV、vein of the filum terminale まで繋がる静脈は、それぞれ 1 本の縦軸方向の長い血管であるといえる。Radiculomedullary vein と bridging vein は合わせて 30-70 本 (平均 50 本以上) 認められ、そのうち 60-70% が radiculomedullary vein、30-40% が bridging vein である¹⁻⁵⁾。

頭蓋内で radiculomedullary vein に相当する血管は、脳神経に伴走する静脈であると考えられ、三叉神経近傍を走行する petrosal vein、下位脳神経に伴走して内頸静脈や下錐体静脈洞に繋がる静脈、舌下神経に伴走する静脈がそれにあたり、satellite vein として報告されている¹⁰⁾。一方で、頭蓋内で脳神経に沿わない走行を示す bridging vein も脳幹周囲には存在しており、median anterior pontomesencephalic vein や transverse pontine vein から海綿静脈洞に繋がる bridging vein や、延髄表面の静脈から marginal sinus や occipital sinus に繋がる bridging vein がそれにあたると考えられる^{11,12)}。

脊髄の静脈血を硬膜外に還流する radiculomedullary vein や bridging vein は、頭蓋内の静脈と同様に静脈弁が存在しない。その代わりに硬膜貫通部に生理的狭窄が存在しており、逆流防止機構として機能しているとされる。

6. 硬膜外静脈叢

脊柱管内の硬膜外腔は固有硬膜 (硬膜内層) と骨膜 (硬膜外層) に挟まれた腔であり、内部に硬膜外静脈叢や脂肪組織などを含んでいる。硬膜外静脈叢は、脊柱管内の腹側/ 外側/ 背側の位置により、ventral/ lateral/ dorsal epidural venous plexus として分けられている。椎体内の静脈血は椎体内の静脈である basivertebral vein を介して ventral epidural venous plexus に、脊髄硬膜内の静脈血は radiculomedullary vein や bridging vein を介して lateral epidural venous plexus に、椎弓の静脈血は dorsal epidural venous plexus に還流する。この硬膜外静脈叢の ventral/ dorsal は脊柱管に対する位置関係で腹側/ 背側の名前が付けられているのに対して、椎体を栄養する ventral/ dorsal somatic branch は、椎体に対する位置関係で腹側/ 背側の名前が付けられていることに注意が必要であり、特に後述する硬膜外動静脈瘻の典型例においては、椎体背側で "dorsal" somatic branch が main feeder となり、"ventral" epidural venous plexus にシャントを形成していることが多い。

脊柱管腹側の ventral epidural venous plexus は上下・左右との繋がりが豊富であり、dorsal somatic branch と同様に hexagon shape を形成する。この ventral epidural venous plexus は、海綿静脈洞に対する Parkinson 三角のアプローチを報告した Parkinson によって、extradural neural axis compartment (EDNAC) の一部であると提唱されている¹³⁾。EDNAC は眼窩内から海綿静脈洞、脳底静脈叢、脊椎の epidural venous plexus までを一連の硬膜外静脈としてとらえる概念であり、その内部には脂肪・動脈・静脈・神経が通過する。

硬膜外静脈叢は内椎骨静脈叢 (internal vertebral venous plexus) と呼ばれ、椎間静脈 (intervertebral vein) や椎体周囲の静脈叢 (external vertebral venous plexus) を介して、奇静脈や上行腰静脈等へ流出する。

7. Dural AVF (大後頭孔部 DAVF との相同性)

脊髄硬膜動静脈瘻 (spinal dural arteriovenous fistula: SDAVF) は、硬膜動脈である radiculomeningeal artery が硬膜内の静脈である bridging vein との間で、硬膜上で AV shunt を形成して、bridging vein から脊髄表面の ASV や PSV に逆流し、脊髄の静脈高血圧によるうっ血性脊髄症 (congestive myelopathy) を呈することで発症する¹⁴⁾。Feeder となっている radiculomeningeal artery が分岐する spinal branch から、偶然 radiculomedullary artery や radiculopial artery が分岐することはあるが、胸腰椎レベルの病変では ASA や PSA が SDAVF に直接的・間接的に feeding することはない。

同様の血管解剖を示す頭蓋内病変としては、大後頭孔の non-sinus type の DAVF が挙げられる。前述のように大後頭孔には複数の種類の bridging vein が存在しているが、延髄表面の静脈から marginal sinus などに繋がる静脈は純粋な bridging vein であると考えられ、大後頭孔の硬膜を栄養する上行咽頭動脈や後頭動脈からの meningeal artery が、marginal sinus に繋がる bridging vein との間で AV shunt を形成し、延髄表面の静脈に逆流する形をとる¹⁵⁾。Mitsuhashi らは petrosal vein や延髄の bridging vein に逆流する DAVF は男性に多く、aggressive な神経症候を呈するという共通の特徴を持ち、SDAVF との相同性を示すと報告している¹⁶⁾。Mitsuhashi らの報告の中では、petrosal vein に逆流する DAVF (anterolateral type の tentorial DAVF) や頭蓋頸椎移行部の DAVF を含めているが、これらの病変の drainer は三叉神経に沿う petrosal vein や C1 神経根に沿う radiculomedullary vein であり、厳密に考えるとその解剖学的特徴は少し異なってくる。すなわち、脳神経や神経根に沿って流入してくる pial artery の関与がありえる点である。特に頭蓋頸椎移行部の AVF は C1/ C2 level の神経根の走行に沿って脊髄表面・神経根上・硬膜・硬膜外に AV shunt を形成しうるし、ASA・LSA が関与している症例が多い¹⁷⁾。また、ASA からの feeder は微細で脆弱な vasa corona を介しているために、vasa corona に血流負荷がかかることにより動脈瘤が発生し、その動脈瘤が破裂することによるくも膜下出血を呈しやすいことが、胸腰椎レベルの SDAVF と大きく異なる特徴である。

一方で、延髄表面から marginal sinus に繋がる静脈は脳神経に沿わない純粋な bridging vein であり、神経に沿って脊髄動脈から硬膜まで pial artery が繋がることは考えにくいいため、大後頭孔の DAVF では ASA・LSA は関与しない可能性が高い。

8. Epidural AVF (海綿静脈洞部 DAVF との相同性)

脊髄硬膜外動静脈瘻 (spinal epidural arteriovenous fistula: SEAVF) は、脊柱管を形成する骨を栄養する動脈である ventral/ dorsal somatic branch や prelaminar artery、もしくは radiculomeningeal artery が硬膜外で epidural venous plexus との間に AV shunt を形成し、epidural venous plexus が拡張して神経根を圧迫することによる神経根症 (radiculopathy)、もしくは病変部周囲の流出路が血栓閉塞することによって硬膜内の radiculomedullary vein を介して ASV・PSV に逆流し、脊髄の静脈高血圧によるうっ血性脊髄症 (congestive myelopathy) を呈することで発症する¹⁴⁾。

前述の様に EDNAC という概念があり、これによると海綿静脈洞から脊椎の epidural venous plexus は連続性があることになり、それらに発生する AV shunt は同一範疇の疾患である可能性がある。海綿静脈洞部 DAVF は硬膜動脈もしくは骨を貫通する trans-osseous artery が feeder となり、EDNAC の一部である海綿静脈洞との間に AV shunt を形成するという血管構築の側面で、SEAVF と相同性が認められる。

DAVF を硬膜外静脈の発生学的な違いで 3 分類した報告において、SEAVF および海綿静脈洞部 DAVF は ventral epidural shunt に相当し、同一範疇の病変であることが示唆されており、その特徴として女性に多く、良性の症候を呈し、静脈流出部の狭窄・閉塞が生じなければ硬膜内逆流は生じないことが示されている¹⁸⁾。

海綿静脈洞部 DAVF では海綿静脈洞の静脈圧が亢進することで脳神経麻痺を、また上眼静脈に逆流することで眼症状を生じて診断されることが多い。さらに下錐体静脈洞や上眼静脈の血栓閉塞が進み、脳表静脈等への逆流流量が増加して静脈性梗塞や脳出血を呈するが、その頻度は比較的少ない¹⁹⁾。この様に海綿静脈洞 DAVF の場合には軽症の Borden type I の段階で症候を呈して診断されやすいが、SEAVF の場合には周囲の epidural venous plexus から脊柱管外にシャント血が流出する Borden type I に相当する段階では症候は呈しづらいと考えられ、病期が進行して radiculomedullary vein に逆流するようになった Borden type III に相当する状況で初めて発見されることが多いという点が相違点ということになる。また、海綿静脈洞部 DAVF は女性に多いのに対し、SEAVF は高齢男性に多いことも相違点である¹⁴⁾。

9. Osseous AVF (anterior condylar AVF との相同性)

脊椎の osseous AVF は稀だが、報告では椎体内に発生することが多く、骨を栄養する ventral/ dorsal somatic branch が feeder となり、椎体内の静脈 (basivertebral vein) との間に AV shunt を形成し、epidural venous plexus に流出する。臨床的には SEAVF と同様に、radiculopathy もしくは硬膜内に逆流することによる congestive myelopathy で発症しうるが、比較的 shunt 血流が多いために epidural venous plexus が拡張することによる radiculopathy や compressive myelopathy で発症することが多い²⁰⁾。

頭蓋内の osseous AVF として多く報告されているのは、anterior condylar AVF や clival AVF であり、特に anterior condylar AVF では jugular tubercle 内に存在する骨内静脈構造 (jugular tubercle venous complex) がその発生に関与していると報告されている²¹⁾。また、海綿静脈洞部の DAVF で最も多く認められる posteromedial shunted pouch も dorsum sellae の骨内に shunt を形成していることがある。これらの頭蓋内 osseous AVF では両側からの feeding、intraosseous feeder の関与、耳

鳴や眼症状などの benign な症候で発症しやすいなどの共通する臨床的特徴があり²²⁾、これらの特徴は脊椎の osseous AVF と同様である。また、頭蓋内の osseous AVF は、軟骨性骨化によって発生した頭蓋骨内に生じることが多いが、脊椎椎体も軟骨性骨化によって発生するとされており、軟骨性骨には osseous AVF が発生しやすい可能性がある。これには、軟骨性骨内では basivertebral vein や jugular tubercle venous complex などの骨内静脈構造が発達しており、ventral/ dorsal somatic branch などの骨を栄養する動脈も豊富であることが関係しているであろう。

10. おわりに

脊椎脊髄の血管解剖を概説した上で、それらの血管解剖が密接に関わる脊柱管内の動静脈シャント疾患の血管解剖を、頭蓋内の動静脈シャント疾患と比較しながらまとめた。脊椎脊髄の血管は狭い範囲に存在する微小な血管ではあるが、正常血管解剖を理解できれば異常血管の構造は把握しやすくなり、正確な診断と適切な治療につなげることができると思われる。

参考文献

1. Lasjaunias P, terBrugge KG, Berenstein A. Surgical Neuroangiography, Vol.1. Springer-Verlag, Berlin, 2011
2. Thron AK. Vascular anatomy of the spinal cord: Radioanatomy as the key to diagnosis and treatment. Second edition. Springer International publishing. 2016
3. 小宮山雅樹. 脳脊髄血管の機能解剖 詳細版. メディカ出版, 大阪. 2011
4. 小宮山雅樹. 脊髄・脊椎の機能血管解剖. No Shinkei Geka 41:481-492, 2013
5. Bosmia AN, Hogan E, Loukas M, et al. Blood supply to the human spinal cord: part I. Anatomy and hemodynamics. Clin Anat 28:52-64, 2015
6. Lasjaunias P, Vallee B, Person H, et al. The lateral spinal artery of the upper cervical spinal cord. Anatomy, normal variations, and angiographic aspects. J Neurosurg 63:235-241, 1985
7. Siclari F, Burger IM, Fasel JH, et al. Developmental anatomy of the distal vertebral artery in relationship to variants of the posterior and lateral spinal arterial systems. AJNR Am J Neuroradiol 28:1185-1190, 2007
8. Namba K. Vascular Anatomy of the Cauda Equina and Its Implication on the Vascular Lesions in the Caudal Spinal Structure. Neurol Med Chir (Tokyo) 56:310-316, 2016
9. Sakka L, Gabrillargues J, Coll G. Anatomy of the spinal meninges. Oper Neurosurg (Hagerstown) 12:168-188, 2016
10. Duvernoy HM. The superficial veins of the human brain: veins of the brain stem and of the base of the brain. Springer, Berlin, 1975.
11. Kiyosue H, Tanoue S, Sagara Y, et al. The anterior medullary-anterior pontomesencephalic venous system and its bridging veins communicating to the dural sinuses: normal anatomy and drainage routes from dural arteriovenous fistulas. Neuroradiology 50:1013-1023, 2008

12. Hiramatsu M, Ozaki T, Tanoue S, et al. Detailed anatomy of bridging veins around the foramen magnum: a multicenter study using three-dimensional angiography. *Clin Neuroradiol* 34:67-74, 2024
13. Parkinson D. Extradural neural axis compartment. *J Neurosurg* 92:585-588, 2000
14. Kiyosue H, Matsumaru Y, Niimi Y, et al; JSNET Spinal AV Shunts Study Group. Angiographic and clinical characteristics of thoracolumbar spinal epidural and dural arteriovenous fistulas. *Stroke* 48:3215-3222, 2017
15. Hiramatsu M, Ozaki T, Aoki R, et al. Non-sinus-type dural arteriovenous fistula at the foramen magnum: A review of the literature. *JNET J Neuroendovasc Ther* 2023 (epub ahead of print).
16. Mitsuhashi Y, Aurboonyawat T, Pereira VM, et al. Dural arteriovenous fistulas draining into the petrosal vein or bridging vein of the medulla: possible homologs of spinal dural arteriovenous fistulas. Clinical article. *J Neurosurg* 111:889-899, 2009
17. Hiramatsu M, Sugiu K, Ishiguro T, et al. Angioarchitecture of arteriovenous fistulas at the craniocervical junction: a multicenter cohort study of 54 patients. *J Neurosurg* 128:1839-1849, 2018
18. Geibprasert S, Pereira V, Krings T, et al. Dural arteriovenous shunts: a new classification of craniospinal epidural venous anatomical bases and clinical correlations. *Stroke* 39:2783-2794, 2008
19. Satomi J, Satoh K, Matsubara S, et al. Angiographic changes in venous drainage of cavernous sinus dural arteriovenous fistulae after palliative transarterial embolization or observational management: a proposed stage classification. *Neurosurgery* 56:494-502, 2005
20. Song Y, Cho SH, Lee DW, et al. Osseous versus nonosseous spinal epidural arteriovenous fistulas: Experiences of 13 patients. *AJNR Am J Neuroradiol* 40:129-134, 2019
21. Mizutani K, Akiyama T, Minami Y, et al. Intraosseous venous structures adjacent to the jugular tubercle associated with an anterior condylar dural arteriovenous fistula. *Neuroradiology* 60:487-496, 2018
22. Hiramatsu M, Sugiu K, Haruma J, et al. Osseous arteriovenous fistulas in the dorsum sellae, clivus, and condyle. *Neuroradiology* 63:133-140, 2021

Figure legends

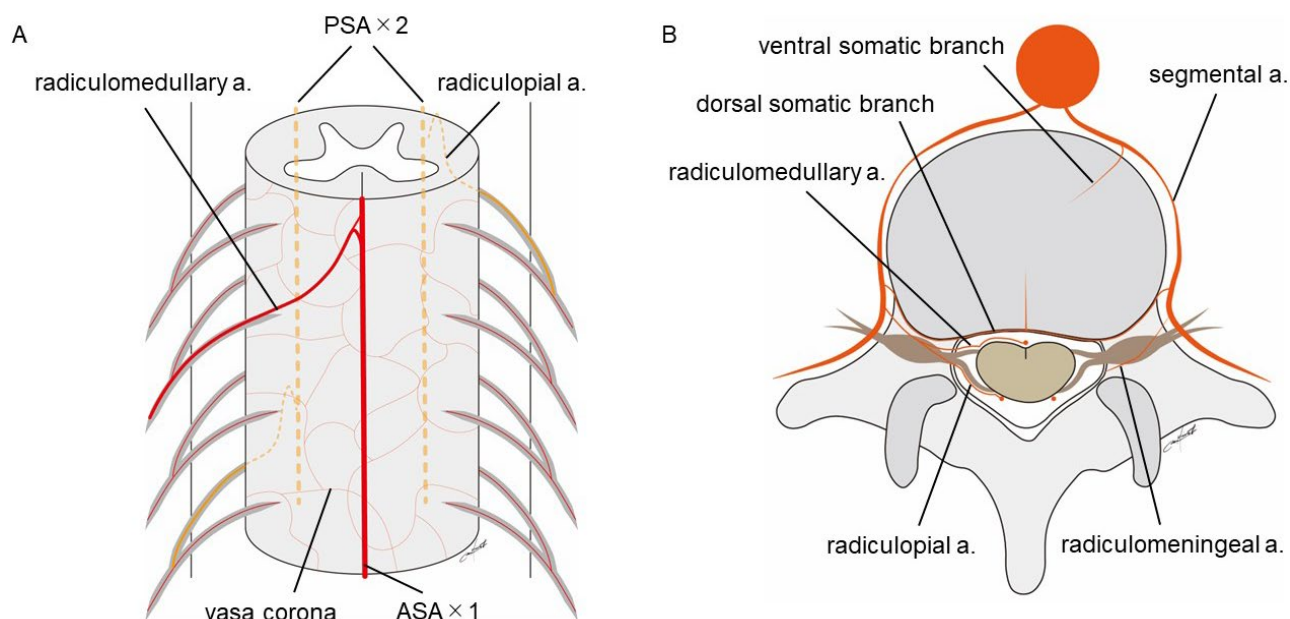


Fig.1 : 脊髄と脊髄動脈の基本構造

A : 脊髄と脊髄動脈の模式図、前後像（石黒友也, NNAC2018 Proceeding Figure から改変）

B : 脊椎・脊髄と、脊柱管内の動脈の模式図、軸位像

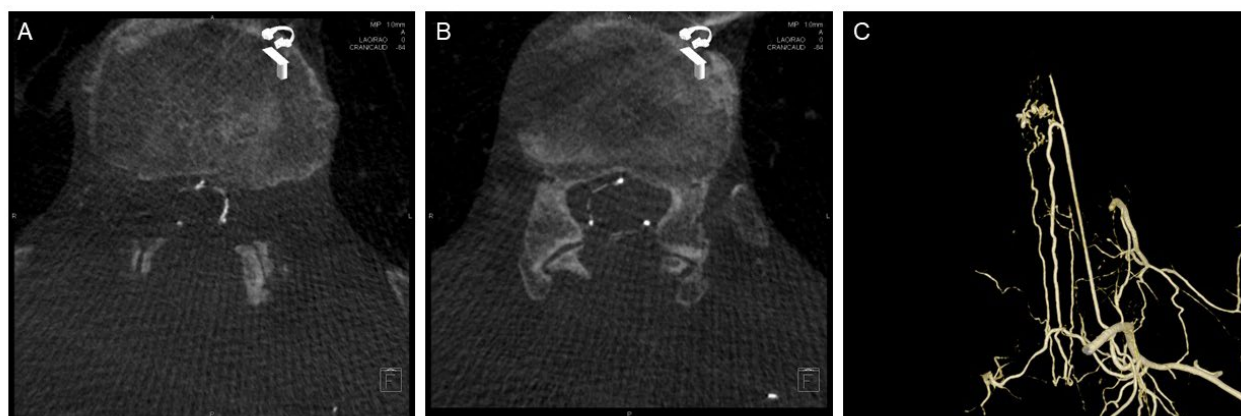


Fig.2 : ASA・PSA の関係性と conus basket

A,B: 脊髄円錐部の hemangioblastoma 症例の断層像水平断。一つの segmental artery から ASA・左 PSA が分岐している症例（Fig.3C と同一症例）だが、vasa corona を介して右 PSA も描出されている。

C: 胸髄 AVM 症例の 3D-DSA。Radiculomedullary artery から移行した直後の ASA から sulcal artery を介して供血しているが、ASA は下降して脊髄円錐部に到達し、「W」字状に両側 PSA に繋がって、両側 PSA が上行している。右 PSA は直接 AVM に、左 PSA は vasa corona を介して供血している。

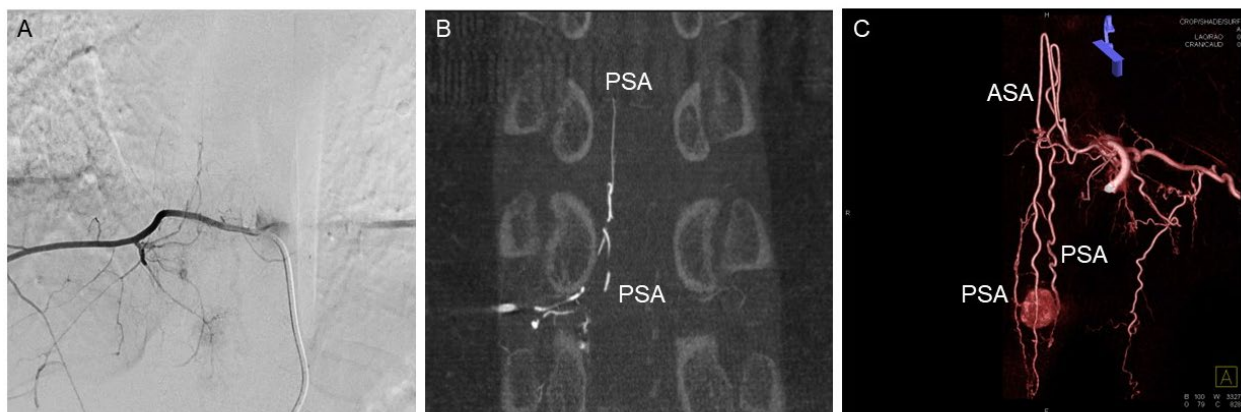


Fig.3 : Radiculopial artery と PSA の繋がり

A,B : 胸椎レベルの segmental artery から認めた radiculopial artery と右 PSA。

C : 脊髄円錐部の hemangioblastoma 症例の 3D-DSA。一つの segmental artery から ASA・左 PSA が分岐しているが、radiculomedullary artery から ASA の hairpin bend の角度と比較して、radiculopial artery から PSA の hairpin bend の角度はより鋭角であり、PSA は蛇行が強いことが分かる。

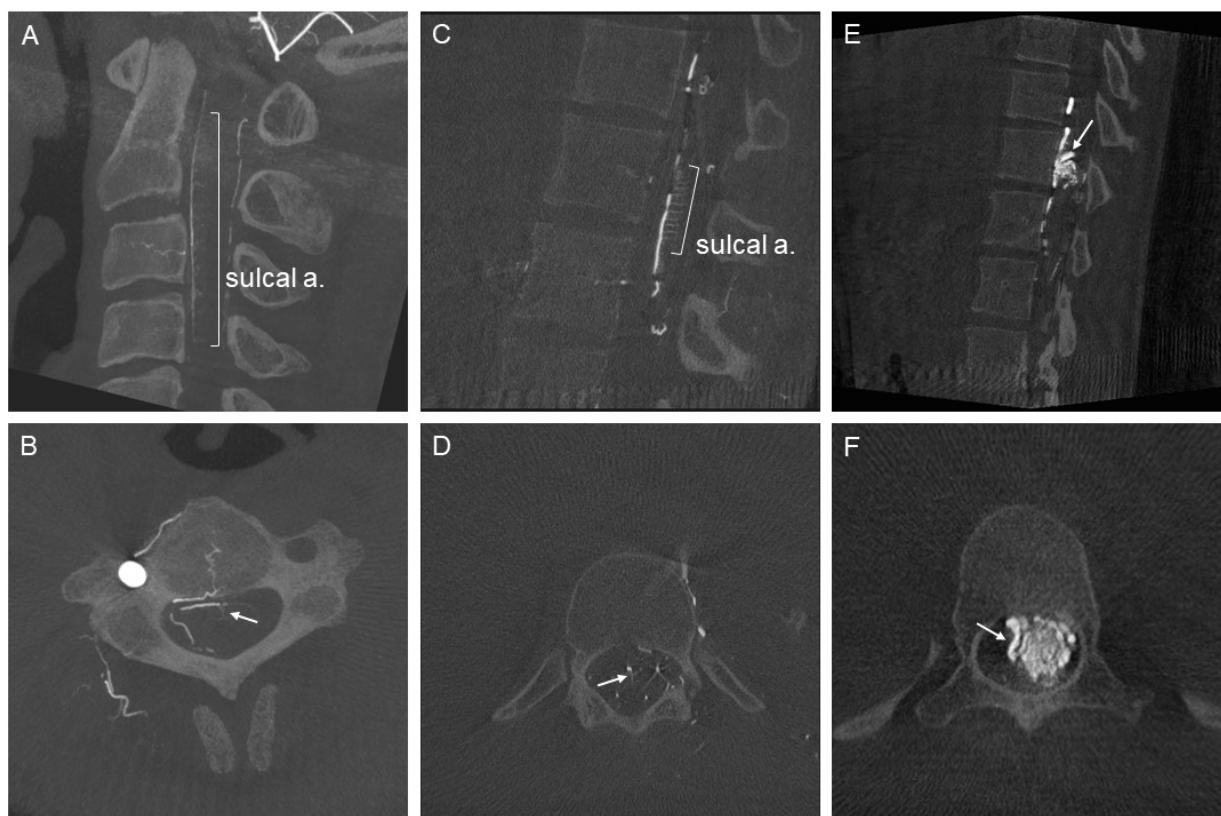


Fig.4 : ASA と sulcal artery の関係

A,B : 頸髄の hemangioblastoma 症例の断層像矢状断・水平断。C4 segmental artery から radiculomedullary artery と posterior radiculopial artery が分岐している症例。ASA から正常 sulcal

artery の分岐角度はほぼ直角。

C,D : 胸髄 AVM 症例 (Fig.2C と同一症例) の断層像矢状断・水平断。脊髓円錐近傍で複数の正常 sulcal artery が ASA から背側に向かって分岐している。

E,F : 脊髓円錐部近傍の AVM 症例の断層像矢状断・水平断。Feeder となって太くなった sulcal artery が斜め上に向けて走行している。水平断では AVM は脊髓髄内の左側に存在しており、feeder となっている sulcal artery (矢印) は AVM の右側に偏倚している。

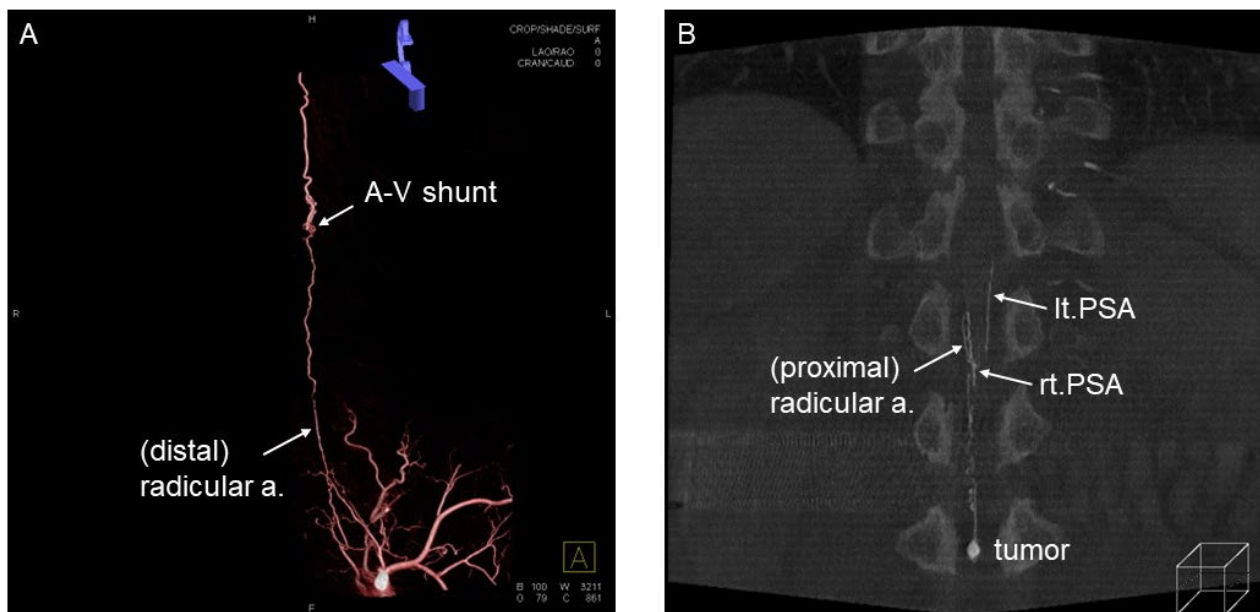


Fig.5 : Radicular artery

A : 左 S2 馬尾神経前根上に発生した radicular AVF 症例の 3D-DSA。外側仙骨動脈から分岐した左 S2 (distal) radicular artery が feeder となって、神経根上で A-V shunt を形成していると考えられた。

B : 馬尾神経上 (レベル不明) に発生した hemangioblastoma 症例の断層像冠状断。ASA から conus basket を介して右 PSA が描出され、右 PSA から分岐して下行する (proximal) radicular artery が feeder となって、神経根上の腫瘍に供血していると考えられた。

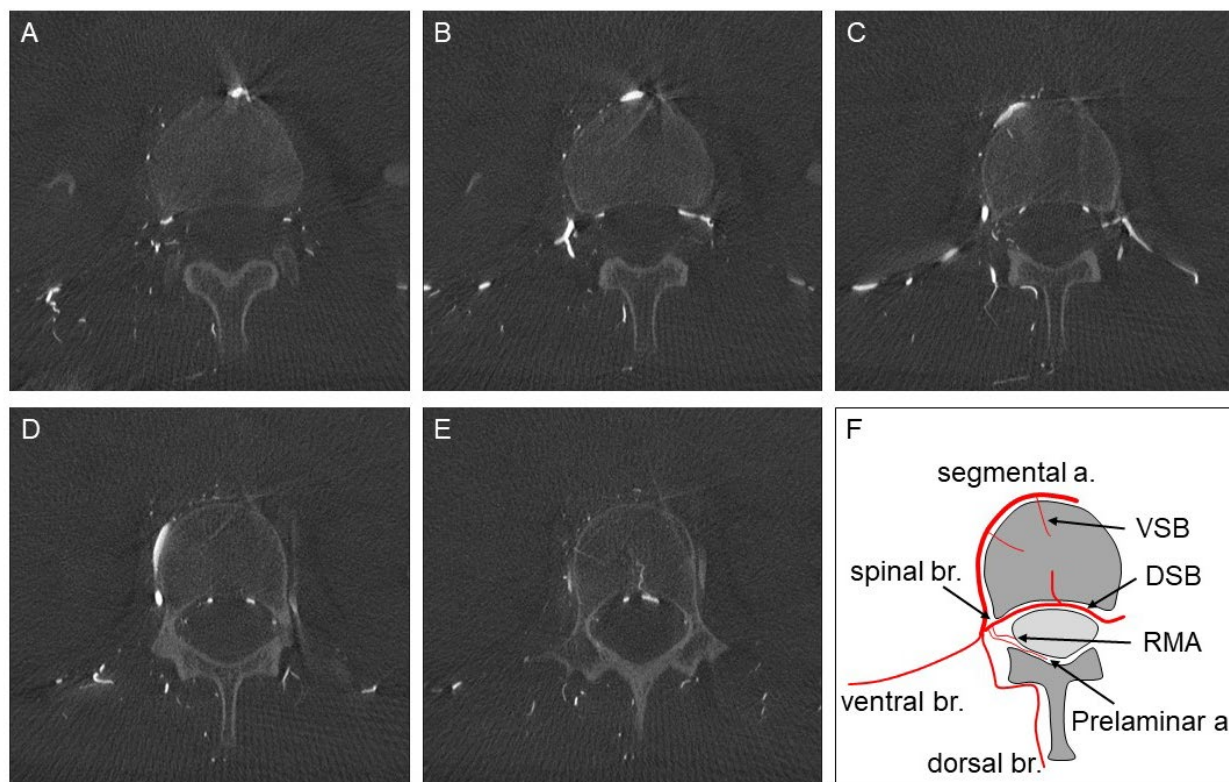


Fig.6 : Segmental artery からの 3 分枝

A-E : 尾側 (A) から頭側 (E) に向かって並べた分節動脈撮影の断層像水平断。

F : 模式図。Segmental artery から ventral/ dorsal/ spinal branch が分岐し、spinal branch から dorsal somatic branch (DSB)、radiculomeningeal artery (RMA)、prelaminar artery が分岐する。Segmental artery 本幹から直接 ventral somatic branch (VSB) が分岐する。

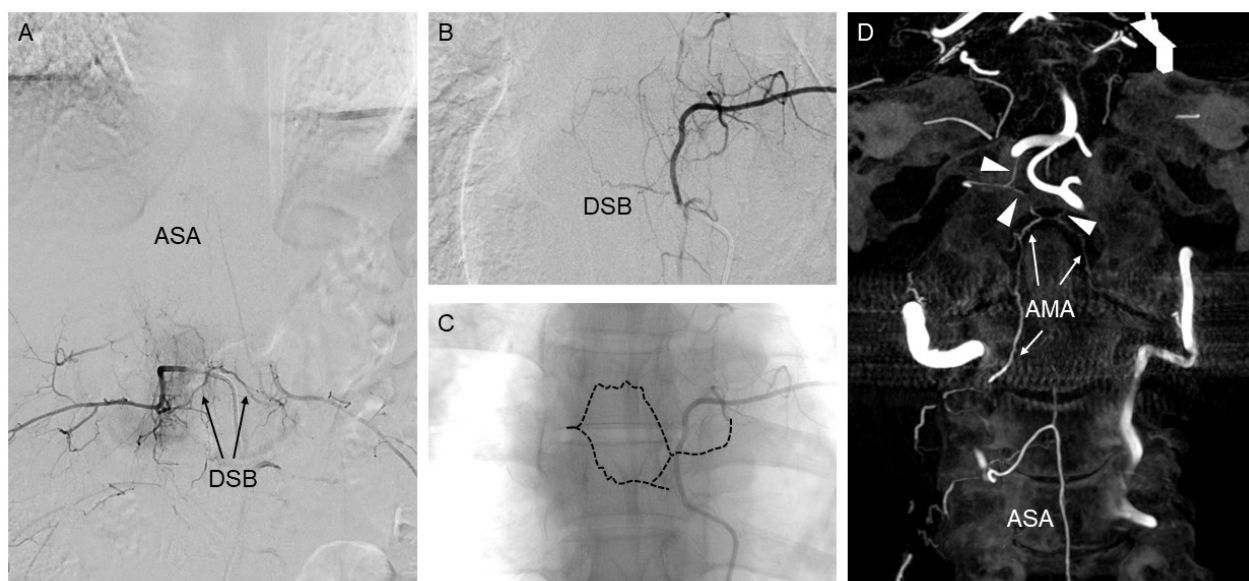


Fig.7 : Dorsal somatic branch (DSB)

A : 右側の segmental artery の DSA 正面像で、DSB による retrocorporeal anastomosis を介して対

側の segmental artery と、そこから分岐する radiculomedullary artery および ASA が描出されている (Fig.6A-E と同一症例)。

B : Segmental artery の撮影正面像 (DSA および non-subtraction image) で、hexagon shape の retrocorporeal anastomosis が描出されている。

C : 右椎骨動脈撮影の断層像冠状断で、C3 レベルから分岐して歯突起周囲を走行する anterior meningeal artery (AMA) から、その頭側につながる DSB に相当する血管 (矢頭) が確認できる。また、C4 レベルから分岐した radiculomedullary artery から ASA が描出されている。

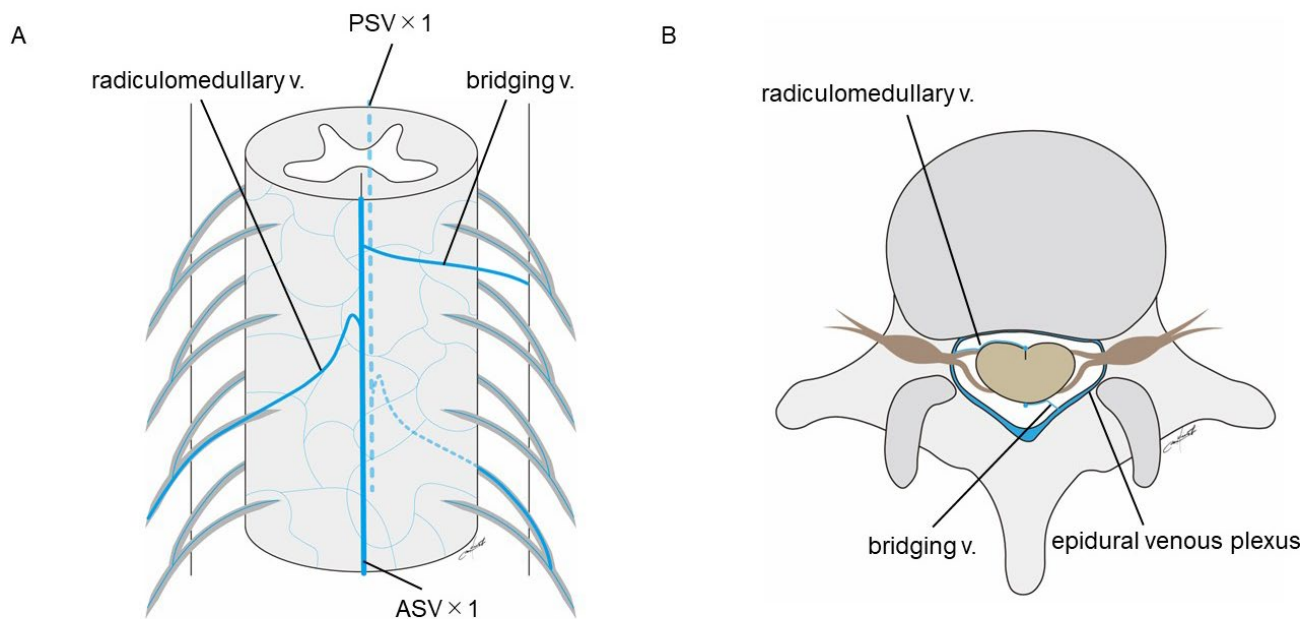


Fig.8 : 脊髓と脊髄静脈の基本構造

A : 脊髓と脊髄静脈の模式図、前後像 (石黒友也, NNAC2018 Proceeding Figure から改変)

B : 脊椎・脊髓と、脊柱管内の静脈の模式図、軸位像